

УДК 519.72

Каледина Н. Б., старший преподаватель (БГТУ);
 Медяк Д. М., кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОГО ПРОЦЕССА НА ЛИПКОСТЬ КРАСКИ

В статье с помощью методов математического планирования многофакторного эксперимента и обработки полученных результатов исследуется зависимость параметра оптимизации, в качестве которого выбрана липкость краски, от нескольких факторов: вида бумаги, вязкости краски, давления печати. В результате проведенных расчетов получены уравнения регрессии в виде полинома 2-го порядка, характеризующие вклад каждого фактора и условия печатного процесса.

In the article it is considered the methods of mathematical planning of multifactor experiments and processing the results the dependence of the adhesion of printing ink from several factors: the type of paper, the viscosity of paints, printing pressure. The calculations derived regression equation as a polynomial of order 2, which characterize the contribution of each factor in the drying process of print.

Введение. Как указано в ряде работ [1, 2, 3], липкость печатной краски существенно влияет на поведение краски в процессе печатания и на качество оттиска. При этом процессе передачи краски между печатными поверхностями сопутствуют прилипание краски к той поверхности, с которой она соприкасается, и сопротивление красочного слоя.

В работе [1] показано, что сопротивление разделенного слоя возрастает с увеличением его вязкости и скорости разделения, выведена функциональная зависимость липкости от вязкости краски и скорости вращения валика. Однако в зависимости не учитывается влияние давления печати, вида бумаги и других факторов.

На основании значений параметров, используемых на практике и полученных ранее в результате расчетов, были проведены исследования влияния изменения скорости, давления печати, вязкости краски и вида бумаги на липкость печатной краски. В связи с тем, что на липкость влияют многие факторы, в процессе исследований были использованы статистические методы планирования многофакторного эксперимента и обработки полученных результатов [4]. Преимуществами этого эксперимента являются:

- 1) сокращение количества проводимых опытов;
- 2) большая эффективность по сравнению с экспериментами, где происходит изменение только одного фактора;
- 3) выявление фактора, оказывающего наибольшее влияние на параметр оптимизации;
- 4) определение характера влияния каждого фактора;
- 5) использование всех данных при учете влияния каждого фактора;
- 6) выявление влияния взаимодействия факторов на параметр оптимизации;
- 7) возможность исследования условий проведения эксперимента или процесса.

Основная часть. На первом этапе был проведен эксперимент установления влияния вязкости, давления печати и скорости печати на липкость печатной краски. Для этого был использован некомпозиционный план Бокса – Бенкина второго порядка для трех факторов. Общее число опытов $N = 12 + 3$, где 12 — число опытов при кодированных уровнях факторов ($x_i = \pm 1$ и 0), а 3 — число опытов при нулевых уровнях факторов ($x_i = 0$).

Матрица плана и результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица плана Бокса – Бенкина

| Номер опыта | x_1 | x_2 | x_3 | x_1x_2 | x_1x_3 | x_2x_3 | x_1^2 | x_2^2 | x_3^2 | y |
|-------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|-------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | +1 | 0 | 0 | +1 | +1 | 0 | 1,20 |
| 2 | +1 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | +1 | +1 | 0 | 1,40 |
| 3 | -1 | +1 | 0 | -1 | 0 | 0 | +1 | +1 | 0 | 1,80 |
| 4 | +1 | +1 | 0 | +1 | 0 | 0 | +1 | +1 | 0 | 2,70 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0,70 |
| 6 | +1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0,80 |
| 7 | -1 | 0 | +1 | 0 | -1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 2,30 |
| 8 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 2,80 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | +1 | 0 | +1 | +1 | 0,55 |
| 10 | 0 | +1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | +1 | +1 | 1,00 |
| 11 | 0 | -1 | +1 | 0 | 0 | -1 | 0 | +1 | +1 | 1,90 |
| 12 | 0 | +1 | +1 | 0 | 0 | +1 | 0 | +1 | +1 | 3,30 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,60 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,75 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,90 |
| Σ | 1,70 | 3,75 | 7,25 | 0,70 | 0,40 | 0,95 | 13,7 | 13,85 | 13,35 | 25,70 |

В этой таблице x_1 — вязкость ($x_1 = -1$; 9,5 Па·с; $x_1 = 0$; 15,5 Па·с; $x_1 = +1$; 21,5 Па·с); x_2 — скорость печати ($x_2 = -1$; 10 тыс. отт./ч; $x_2 = 0$; 30 тыс. отт./ч; $x_2 = +1$; 50 тыс. отт./ч); x_3 — давление печати ($x_3 = -1$; 0,05 МПа; $x_3 = 0$; 0,15 МПа; $x_3 = +1$; 0,25 МПа).

Кодирование уровней факторов проводилось по формуле (1).

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - 0,5(\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min})}{0,5(\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min})}, \quad (1)$$

где x_i — кодированный уровень i -го фактора; \tilde{x}_i , $\tilde{x}_{i\max}$, $\tilde{x}_{i\min}$ — текущее, максимальное и минимальное значения i -го фактора.

В качестве параметра оптимизации y была выбрана липкость краски ($y = \sigma_v$, МПа).

Ошибка эксперимента S_y и дисперсия параметра S_y^2 находятся по результатам трех опытов на нулевом уровне факторов (опыты 13–15). Они соответственно составляют $S_y = 0,15$ и $S_y^2 = 0,0225$.

Значения коэффициентов уравнения $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$ рассчитываются по формулам (2)–(5).

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}; \quad (2)$$

$$b_i = A \sum_{n=1}^N x_{in} y_n; \quad (3)$$

$$b_{ij} = D \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} y_n; \quad (4)$$

$$b_{ii} = B \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n + C \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N x_{in}^2 y_n - \frac{\sum_{n=1}^{n_0} y_{0n}}{n_0 p}, \quad (5)$$

где n_0 — число опытов на нулевом уровне (в данном случае $n_0 = 3$); k — число факторов; y_{0n} — значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов (опыты 13–15); y_n — значение параметра оптимизации в n -й строке матрицы; x_i — кодированные уровни факторов; $A = 1/8$; $B = 1/4$; $C = 1/16$; $D = 1/4$; $p = 2$.

В результате проведенных расчетов были получены следующие коэффициенты уравнения: $b_0 = 1,75$; $b_1 = 0,2125$; $b_2 = 0,469$; $b_3 = 0,906$; $b_{12} = 0,175$; $b_{13} = 0,1$; $b_{23} = 0,24$; $b_{11} = -0,09$; $b_{22} = -0,052$; $b_{33} = -0,177$. Значимость коэффициентов определяется по формуле (6).

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}, \quad (6)$$

где t — табличные значения критерия Стьюдента при заданном уровне доверия (значимости) α и степени свободы f ; S — ошибка воспроизводимости (в данном случае он равен

2,13 при $\alpha = 0,05$); S_{bi} — ошибка определения коэффициентов b_i , определяемая по формуле $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}$, где S_{bi}^2 — дисперсия при определении коэффициентов.

$$S_{bi}^2 = AS_y^2; \quad (7)$$

$$S_{bij}^2 = DS_y^2; \quad (8)$$

$$S_{bii}^2 = (B + \frac{1}{p^2 n_0}) S_y^2. \quad (9)$$

В результате расчетов получили $S_{bi}^2 = 2,8125 \cdot 10^{-3}$; $S_{bi} = 0,053$; $S_{bij}^2 = 5,625 \cdot 10^{-3}$; $S_{bi} = 0,075$; $S_{bii}^2 = 7,5 \cdot 10^{-3}$; $S_{bi} = 0,087$.

Тогда $\Delta b_0 = 0,1845$; $\Delta b_i = 0,113$; $\Delta b_{ij} = 0,16$; $\Delta b_{ii} = 0,185$.

Следовательно, коэффициенты b_{13} , b_{11} , b_{22} , b_{33} незначимы. Уравнение имеет следующий вид (10).

$$y = 1,75 + 0,213x_1 + 0,469x_2 + 0,906x_3 + 0,175x_1x_2 + 0,24x_1x_3. \quad (10)$$

Для проверки адекватности этого уравнения по критерию Фишера $F = S_{ад}^2/S_y^2$ дисперсия адекватности $S_{ад}$ находится по формуле (11).

$$S_{ад} = \frac{SS_{ост} - SS_y}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (11)$$

где m — число значимых коэффициентов;

$$SS_{ост} = \sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_n)^2; \quad SS_y = \sum_{n=1}^{n_0} (y_{0n} - \bar{y}_0)^2; \quad \bar{y}_0 —$$

среднее значение параметра оптимизации трех опытов на нулевом уровне факторов; $(\hat{y}_n - y_n)$ — разность между расчетным значением и опытным значением.

В данном случае $SS_y = 0,045$. Следовательно, $S_{ад} = 0,01215$, а $F = 0,01215/0,0225 < 1$, т. е. уравнение адекватно при всех уровнях доверия α .

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на липкость печатной краски оказывает давление печати (x_3), влияние вязкости краски (x_1) и скорости печати значительно меньше (x_2).

Максимальное значение $y = 3,3$ МПа получено при $x_1 = 0$; $x_2 = +1$; $x_3 = -1$, т. е. при вязкости 15,5 Па·с, скорости печати 50 тыс. отт./ч и давлении печати 0,25 МПа.

Таким образом, чем выше давление печати, скорость печати и вязкость краски, тем быстрее возрастает ее липкость.

Полученные данные согласуются с практикой печати и ранее полученными результатами.

Рассмотрим также влияние вида бумаги на скорость при различных уровнях вязкости краски и давления печати. Используя данные

о липкости краски, приведенные в работе [3], рассмотрим зависимость между видом бумаги, вязкостью краски и скоростью печати.

Для этого построим матрицу плана 3×3 (табл. 2), где 3 — три уровня бумаги ($x_1 = -1$, газетная бумага; $x_1 = 0$, офсетная, $x_1 = +1$, мелованная бумага) и три уровня вязкости краски ($x_2 = -1$, 9,4 Па·с; $x_2 = 0$, 14,4 Па·с; $x_2 = +1$, 19,4 Па·с). В качестве параметра оптимизации используется предельная скорость печати y .

Пользуясь этой матрицей плана, исследуем зависимость между давлением печати (x_3) и скоростью печати на этих бумагах. Ошибки опытов составили $S_1 = 1,2235$; $S_2 = 2,408$; дисперсии — $S_1^2 = 1,497$; $S_1^2 = 5,8$.

Обработка результатов проводилась по описанной методике [4]. Значения коэффициентов уравнения $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ находились по формулам (12)–(17).

$$b_0 = A_0(0Y) - A_{01}(11Y) - A_{02}(22Y); \quad (12)$$

$$b_1 = A_1(1Y); \quad (13)$$

$$b_2 = A_2(2Y); \quad (14)$$

$$b_{12} = A_{12}(12Y); \quad (15)$$

$$b_{11} = A_{12}(11Y) - A_{01}(01Y); \quad (16)$$

$$b_{22} = A_{22}(22Y) - A_{02}(0Y). \quad (17)$$

В данной системе значения коэффициентов составили $A_0 = 0,55556$, $A_{01} = A_{02} = 0,33333$, $A_{12} = 0,25$; $A_{11} = A_{22} = 0,5$ [4].

Выражения в скобках (0Y)–(22Y) — алгебраические суммы произведений столбцов y_1 и y_2 на столбцы x_1 ; x_2 ; x_1x_2 ; x_1^2 и x_2^2 .

В результате получены следующие значения коэффициентов уравнений. Для y_1 : $b_0 = 13,7$; $b_1 = 16,4$; $b_2 = -9,8$; $b_{12} = -6,5$; $b_{11} = 13,7$ и $b_{22} = 2,4$. Для y_2 : $b_0 = 27,23$; $b_1 = 32,32$; $b_3 = -13,72$; $b_{13} = -9,2$; $b_{11} = 27,04$ и $b_{33} = 4,03$.

Уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$y_1 = 13,7 + 16,4x_1 - 9,8x_2 - 6,5x_1x_2 + 13,7x_1^2 + 2,4x_2^2; \quad (18)$$

$$y_2 = 27,23 + 32,32x_1 - 13,72x_3 - 9,2x_1x_3 + 27,04x_{12} + 4,03x_{32}. \quad (19)$$

В уравнении (19) x_3 — давление печати.

Значимость коэффициентов уравнений определяли путем сравнения их абсолютных значений с доверительными интервалами этих коэффициентов по формуле (6). В данном случае $t = 2,262$ при $\alpha = 0,05$ и $f = 9$. Для y_1 доверительные интервалы равны: $\Delta b_0 = 2,06$; $\Delta b_1 = \Delta b_2 = 1,129$; $\Delta b_{12} = 1,384$ и $\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 1,957$, т. е. все коэффициенты значимы.

Проверка адекватности уравнения (18) проводилась путем сравнения дисперсии адекватности с дисперсией параметра оптимизации по критерию Фишера.

Дисперсия адекватности вычисляется по формуле (20).

$$S_{ад} = \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_n)^2}{N - m}, \quad (20)$$

где \hat{y}_n — расчетное значение параметра в n -й строке; y_n — опытное значение y ; N — число опытов ($N = 9$); m — число значимых коэффициентов уравнения.

В результате выполненных расчетов $S_{ад} = 10,783$, а $F = 4,478 < F_{кр} = 7$ (при $\alpha = 0,01$; $f = 9$). Следовательно, уравнение (18) адекватно.

Для y_2 доверительные интервалы равны: $\Delta b_0 = 4,06$; $\Delta b_1 = \Delta b_3 = 2,22$; $\Delta b_{13} = 2,723$ и $\Delta b_{11} = \Delta b_{33} = 3,85$, т. е. все коэффициенты уравнения (19) значимы.

Проверка адекватности уравнения подтвердила эту гипотезу, т. к. $S_{ад} = 31,3747$, а $F = 5,4 < F_{кр} = 7$ (при $\alpha = 0,01$ и $f = 9$).

Анализ уравнений (18) и (19) показывает, что наибольшее влияние на скорость печати оказывает вид бумаги (x_1), влияние вязкости краски (x_2) и давления печати (x_3) значительно меньше.

Таблица 2

Матрица плана 3×3 и результаты опытов

| № п/п | x_1 | x_3 | x_1x_3 | x_1^2 | x_3^2 | y_1 | y_2 |
|------------|-------|--------|----------|---------|---------|--------|--------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | 18,08 | 32,70 |
| 2 | -1 | 0 | 0 | +1 | 0 | 11,80 | 23,35 |
| 3 | -1 | +1 | +1 | +1 | 0 | 8,02 | 18,53 |
| 4 | 0 | -1 | 0 | 0 | -1 | 21,91 | 39,63 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14,30 | 28,30 |
| 6 | 0 | +1 | 0 | 0 | +1 | 9,71 | 22,47 |
| 7 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | 65,07 | 117,70 |
| 8 | +1 | 0 | 0 | +1 | +1 | 42,48 | 84,06 |
| 9 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 28,85 | 66,72 |
| Σ_1 | 98,5 | -53,48 | -26,16 | 174,3 | 151,64 | 220,22 | — |
| Σ_2 | 193,9 | -82,31 | -36,81 | 343,06 | 297,75 | — | 433,46 |

Определенный интерес представляет также исследование зависимости вязкости краски, давления печати и предельной скорости печати для таких видов бумаги, как KymExCote, BeregTopGloss, MagnomattSatin, MagnoStar. Исходные данные величин предельной скорости печати этих видов бумаги приведены в табл. 3 [3].

Предварительный анализ этой таблицы показывает, что у бумаги KymExCote предельная скорость печати намного выше, чем у остальных видов бумаги. Причем чем выше вязкость краски и давление печати, тем ниже предельная скорость печати. Эта тенденция наблюдается и для других видов бумаги.

Для получения математической модели зависимости предельной скорости печати (y_1) от величины вязкости краски и вида бумаги применяется разработанная методика [4]. В данном случае используется план 3×4 , где 3 — три уровня вязкости краски ($x_1 = -1$; 9,4 Па·с; $x_1 = 0$; 14,4 Па·с; $x_1 = +1$; 19,4 Па·с), а 4 — четыре уровня бумаги ($x_2 = -1$, MagnomattSatin; $x_2 = -1/3$, BeregTopGloss, $x_2 = +1/3$, MagnoStar, $x_2 = +1$, KymExCote).

Матрица плана 3×4 и значения y_1 и y_2 приведены в табл. 4, где y_1 — предельная скорость печати в зависимости от величины вязкости краски; y_2 — предельная скорость печати в зависимости от величины давления печати.

Примем ошибку опыта $S_1 = 2,321$; $S_1^2 = 5,387$. Значение критерия Стьюдента $t = 2,179$. Для плана 3×4 коэффициенты равны следующим значениям: $A_0 = 0,38021$; $A_{01} = 0,25$; $A_1 = 0,125$; $A_2 = 0,15$; $A_{12} = 0,225$; $A_{11} = 0,375$; $A_{22} = 0,42188$.

Значения коэффициентов уравнения определяются по формулам (12)–(17). В результате проведенных расчетов получены следующие коэффициенты: $b_0 = 11,65$; $b_1 = -8,97$; $b_2 = 17,23$; $b_{12} = -6,86$; $b_{11} = 2,22$ и $b_{22} = 16,9$.

Доверительные интервалы соответственно равны $\Delta b_0 = 2,93$; $\Delta b_1 = 1,68$; $\Delta b_2 = 1,84$; $\Delta b_{12} = 2,253$; $\Delta b_{11} = 2,91$ и $\Delta b_{22} = 3,09$, т. е. коэффициент b_{11} незначим. Таким образом, уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$y_1 = 11,65 - 8,97x_1 + 17,23x_2 - 6,86x_1x_2 + 16,9x_2^2. \quad (21)$$

Проверка адекватности этого уравнения при ошибке опыта $S_1 = 2,321$ (10% от средней величины) подтвердили эту гипотезу, т. к. $S_{ад}^2 = 26,38653$, а $F = 4,9$ и равно $F_{кр} = 4,9$ при $\alpha = 0,01$, $f_1 = 7$; $f_2 = 11$.

Для y_2 ошибка опыта S_2 принимается равной 4. Коэффициенты уравнения равны следующим значениям: $b_0 = 23,16$; $b_1 = -12,63$; $b_2 = 33,92$; $b_{12} = -9,66$; $b_{11} = 4,04$ и $b_{22} = 33,28$.

Таблица 3

Предельные скорости печати для различных видов бумаги

| № п/п | Вид бумаги | Предельная скорость печати, тыс. отт./ч | | | | | |
|-------|----------------|---|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | | Вязкость краски, Па·с | | | Давление печати, МПа | | |
| | | 9,4 | 14,4 | 19,4 | 0,047 | 0,129 | 0,218 |
| 1 | KymExCote | 69,10 | 45,11 | 30,64 | 125,00 | 89,27 | 70,86 |
| 2 | BeregTopGloss | 17,61 | 11,49 | 7,81 | 31,85 | 22,75 | 18,05 |
| 3 | MagnomattSatin | 16,89 | 11,03 | 7,49 | 30,55 | 21,82 | 17,32 |
| 4 | MagnoStar | 25,37 | 16,56 | 11,25 | 45,88 | 32,77 | 26,01 |

Таблица 4

Матрица плана 3×4 и значения предельной скорости печати для различных видов печати

| № п/п | x_1 | x_2 | x_1x_2 | x_1^2 | x_2^2 | y_1 | y_2 |
|------------|---------|--------|----------|---------|---------|--------|--------|
| 1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 16,89 | 30,55 |
| 2 | -1 | -1/3 | +1/3 | +1 | +1/9 | 17,61 | 31,85 |
| 3 | -1 | +1/3 | -1/3 | +1 | +1/9 | 25,37 | 45,82 |
| 4 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | 69,10 | 125,00 |
| 5 | 0 | -1 | 0 | 0 | +1 | 11,03 | 21,82 |
| 6 | 0 | -1/3 | 0 | 0 | +1/9 | 11,49 | 22,75 |
| 7 | 0 | +1/3 | 0 | 0 | +1/9 | 16,56 | 32,77 |
| 8 | 0 | +1 | 0 | 0 | +1 | 45,11 | 89,27 |
| 9 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | 7,49 | 17,32 |
| 10 | +1 | -1/3 | -1/3 | +1 | +1/9 | 7,81 | 18,05 |
| 11 | +1 | +1/3 | +1/3 | +1 | +1/9 | 11,25 | 26,01 |
| 12 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 30,64 | 70,86 |
| Σ_1 | -71,78 | 114,86 | -30,50 | 186,16 | 190,27 | 270,35 | — |
| Σ_2 | -101,04 | 226,11 | -42,93 | 365,52 | 374,52 | — | 532,13 |

Доверительные интервалы соответственно равны: $\Delta b_0 = 4,944$; $\Delta b_1 = 2,835$; $\Delta b_2 = 3,106$; $\Delta b_{12} = 3,803$; $\Delta b_{11} = 4,91$ и $\Delta b_{22} = 5,21$, т. е. коэффициент b_{11} незначим. Таким образом, уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$y_2 = 23,16 - 12,63x_3 + 33,92x_2 - 9,66x_2x_3 + 33,28x_2^2. \quad (22)$$

В данном уравнении x_3 — давление печати.

Проверка адекватности этого уравнения при ошибке опыта $S_2 = 3,7$ тыс. отт./ч подтвердили эту гипотезу, т. к. $S_{ад}^2 = 77,5$, а $F = 4,84$, что меньше табличного $F_{кр} = 4,9$ при $\alpha = 0,01$; $f_1 = 7$; $f_2 = 11$.

Анализ уравнений (21) и (22) показывает, что в обоих случаях наибольшее влияние на предельную скорость печати оказывает вид бумаги (x_2), значительно меньше влияние вязкости краски (x_1) и давления печати (x_3).

Самые низкие значения предельных скоростей будут при печати на бумаге MagnomattSatin ($x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$) при вязкости 9,4 Па·с и при давлении 0,211 МПа, затем на бумаге BeregTopGloss и на газетной бумаге.

Если в уравнения (21) и (22) подставить кодированные уровни вида бумаги ($x_2 = -1, -1/3, +1/3, +1$), то для каждого вида бумаги получаются уравнения связи с вязкостью (x_1) и давлением (x_3).

Для MagnomattSatin ($x_2 = -1$) уравнение имеет вид $y_1 = 11,32 - 2,11x_1$. Для BeregTopGloss ($x_2 = -1$) — $y_1 = 7,79 - 6,68x_1$. Для Magnostar ($x_2 = -1$) — $y_1 = 19,27 - 11,26x_1$. Для Кум-ЕхСоте ($x_2 = -1$) — $y_1 = 45,78 - 15,83x_1$.

При давлении (x_3) соответственно уравнения будут следующими:

$$y_2 = 22,52 - 2,97x_3;$$

$$y_2 = 15,55 - 9,41x_3;$$

$$y_2 = 38,17 - 15,85x_3;$$

$$y_2 = 90,36 - 22,29x_3.$$

Сходство уравнений (21) и (22) указывает на то, что между значениями предельной скорости печати при вязкости красок и при давлении

существует тесная корреляционная связь. Действительно, коэффициент парной корреляции между указанными значениями предельной скорости печати составил $r_{1,2} = 0,991$, а зависимость между y_2 и y_1 выражается уравнением $y_2 = 3,01 + 1,83y_1$.

Таким образом, при известном значении одного из параметров можно рассчитать значение другого, не производя замеров.

Выводы. Полученные уравнения позволяют оптимизировать процесс печатания путем подбора оптимальных значений скорости печати, вязкости краски, давления печати и вида бумаги.

Предложенная методика планирования и проведения эксперимента позволяет не только получить адекватные уравнения регрессии, но и существенно сократить число опытов и наблюдений.

Литература

1. Шахкельдян, Б. Н. Полиграфические материалы / Б. Н. Шахкельдян, Л. А. Загаринская. — М.: Книга, 1988. — 328 с.
2. Старченко, О. П. Влияние неоднородности структуры поверхностей печатного контакта на распределение давления и расход краски / О. П. Старченко // Труды БГТУ, Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. — 2004. — Вып. XII. — С. 51–54.
3. Медяк, Д. М. Теоретическое исследование выщипывания различных видов печатной бумаги / Д. М. Медяк, Г. Г. Демьянова, О. П. Старченко // Труды БГТУ, Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. — 2007. — Вып. XV. — С. 25–28.
4. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Статистика, 1981. — 264 с.
5. Жарский, И. М. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / И. М. Жарский, Б. А. Каледин, И. Ф. Кузьмицкий. — Минск: БГТУ, 2003. — 184 с.

Поступила 14.04.2011